

连续激光辐照材料的三维温度场

张英聪 沈 华 朱日宏

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要 根据连续激光加热靶材的实际情况,建立了连续激光辐照材料的三维物理模型。结合实际边界条件,采用基于积分变换的方法推导出材料的瞬态温度场的解析表达式。利用 Matlab 软件数值模拟了连续激光辐照材料的温升过程,分析了材料的各向异性对温度场的影响,并且讨论了激光参数、辐照时间以及环境变化对靶材温升的影响。结果表明:材料的各向异性将导致温度场的非对称温升;材料表面温升随激光功率和辐照时间的增大而增大;同时材料侧面与空气的对流换热系数对材料表面的温度场分布也起到了一定的影响。

关键词 材料; 温度场; 连续激光; 加工

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0806002

Three-Dimensional Temperature Field of Material Irradiated by Continuous Wave Laser

Zhang Yingcong Shen Hua Zhu Rihong

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract Based on the actual situation of continuous wave (CW) laser heating target material, the three-dimensional physical model of material irradiated by CW-laser is established. Combining with the actual boundary conditions, the analytical expression of the transient temperature field of the material is deduced based on the integral transform method. The temperature rising process of material irradiated by CW-laser is simulated numerically using Matlab software, the influences of the anisotropy of the material is analysed, and the influences of the laser parameters, irradiation time and the environmental changes on the temperature rise of the material are discussed. The results show that the anisotropy of the material will lead to an asymmetric temperature rise, the temperature rise increases with the increase of laser power and irradiating time, and the convective heat transfer coefficient between the material sides and the air plays an important role in the temperature distribution of the material.

Key words materials; temperature field; continuous wave laser; processing

OCIS codes 160.1190; 120.6780; 350.3390

1 引 言

在材料加工领域,激光加热材料的温度场模型^[1]的建立,历来被从事激光加工领域的科研人员所重视。温度场作为激光与材料相互作用过程中的重要参量,是激光加热材料主要的物理特征,直接影响激光加热材料的整个物理过程,同时还会对材料

的物理性能产生直接的影响。研究连续激光与材料的相互作用,主要是确定在连续激光辐照下,材料内部的温度如何变化、分布^[2]。因此,温度场模型的建立,对连续激光与材料相互作用的机理研究具有重要的意义。

在激光与材料相互作用的研究工作中,大多利用

收稿日期: 2013-02-01; 收到修改稿日期: 2013-03-27

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2012802)

作者简介: 张英聪(1987—),男,博士研究生,主要从事精密光学测试、光声光热检测等方面的研究。

E-mail: zhangleo1987@gmail.com

导师简介: 朱日宏(1964—),男,博士,博士生导师,主要从事精密光学测试方面的研究。

E-mail: zhurihong@njjust.edu.cn(通信联系人)

短脉冲^[3]或超短脉冲激光^[4]的瞬时效应作用材料,例如激光致使材料快速成型^[5]、快速损伤^[6-7]等,然而连续激光作用材料较脉冲激光会产生不同的效果,这是由于连续激光的激光功率密度低,热传导产生的温度场在激光与材料相互作用的过程中起到了主要作用,是一种激光慢速加工方法。有关激光引起的热效应研究,国外学者^[8-10]大都用数值方法求解热传导方程,虽然计算复杂程度得以减少,但却很难直接看出材料特性参数对温度场分布、热变形等性能的影响程度。同时在研究各向异性材料性能时也通常假设辐照材料是各向同性的,且不考虑材料在加工过程中的热交换对结果的影响。国内的段晓峰等^[11-13]只给出了基于各向同性材料的瞬时热效应研究。随着各向异性材料热性能受到越来越多的关注,有必要研究与之相符合的温度场模型。本文以单轴材料为研究对象,建立了连续激光辐照单轴材料的温度场模型,采用积分变换方法得到了材料的瞬态温度场的解析表达式,分析了材料各向异性、激光参数以及环境变化对温度场的影响。揭示了连续激光与单轴材料相互作用的一些性质规律。

2 理论模型

假设靶材尺寸为 $2a \times 2b \times c$, 沿 x, y, z 三个方向的导热系数分别为 k_1, k_2 和 k_3 , 在 x, y 方向对流换热系数为 h_1, h_2 , 考虑激光作用晶体的实际环境, 取 $z = c$ 处空气对流换热系数为 h_3 , $z = 0$ 处绝热。热传导方程坐标系如图 1 所示, 加热光束从其一端的中心入射, 光强度分布为 I , 考虑到对称性, 只取其 $1/4$ 区域进行分析。

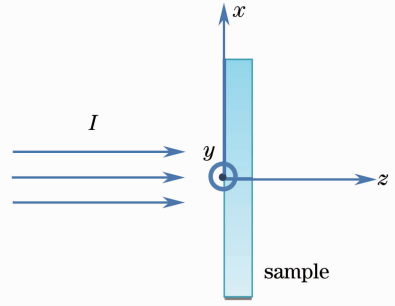


图 1 热传导方程坐标系示意图

Fig. 1 Diagram of the heat conduction equation coordinate system

在笛卡儿坐标系下, 单轴晶体的三维瞬态热传导微分方程可表示为

$$k_1 \frac{\partial^2 \theta(x, y, z, t)}{\partial x^2} + k_2 \frac{\partial^2 \theta(x, y, z, t)}{\partial y^2} + k_3 \frac{\partial^2 \theta(x, y, z, t)}{\partial z^2} + q(x, y, z) = \rho c_p \frac{\partial \theta(x, y, z, t)}{\partial t}, \quad (1)$$

式中 ρ, c_p 分别为材料的密度和比热容, $q(x, y, z)$ 为靶材吸收激光能量产生的内热源能量密度。连续高斯分布激光与材料相互作用时, 材料所吸收的激光能量密度可以表示为

$$q(x, y, z) = \frac{2\alpha p(1-R)}{\pi\omega_p^2} \exp\left(-2\frac{x^2+y^2}{\omega_p^2}\right) \exp(-\alpha z), \quad (2)$$

式中 p 为加热光功率, R 为晶体反射系数, ω_p 为高斯光束的束腰半径, α 为光吸收系数。边界条件为

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = 0, x = 0; \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} + H_1 \theta = 0, x = a, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} = 0, y = 0; \quad \frac{\partial \theta}{\partial y} + H_2 \theta = 0, y = b, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0, z = 0; \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} + H_3 \theta = 0, z = c, \quad (5)$$

式中 $H_1 = h_1/k_1, H_2 = h_2/k_2, H_3 = h_3/k_3$ 。

积分变换法^[11]求解热传导问题常常都是直接从微分方程出发, 通过变换将导数(偏导数)去掉从而得到所求函数的积分变换, 再通过逆变换得到所求问题。

以自变量 x 为例, 对 x 的正变换为

$$\bar{\theta}(\beta_m, y, z) = \int_0^a X(\beta_m, x') \theta(x, y, z) dx', \quad (6)$$

其逆变换为

$$\theta(x, y, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{N(\beta_m)} X(\beta_m, x) \bar{\theta}(\beta_m, y, z), \quad (7)$$

其中本征函数、本征值和模可根据边界条件查表^[14]得到

$$X(\beta_m, x) = \cos(\beta_m x), N(\beta_m) = \frac{a(\beta_m^2 + H_1^2) + H_1}{2(\beta_m^2 + H_1^2)}, \beta_m \text{ 为 } \beta_m \tan(\beta_m a) = H_1 \text{ 的根};$$

$$Y(\gamma_n, y) = \cos(\gamma_n y), N(\gamma_n) = \frac{b(\gamma_n^2 + H_2^2) + H_2}{2(\gamma_n^2 + H_2^2)}, \gamma_n \text{ 为 } \gamma_n \tan(\gamma_n b) = H_2 \text{ 的根};$$

$$Z(\eta_p, z) = \cos(\eta_p z), N(\eta_p) = \frac{c(\eta_p^2 + H_3^2) + H_3}{2(\eta_p^2 + H_3^2)}, \eta_p \text{ 为 } \eta_p \tan(\eta_p c) = H_3 \text{ 的根}.$$

经过(6)式形式的三次正变换后,得到关于 t 的常微分方程为

$$\frac{d\tilde{\theta}(\beta_m, \gamma_n, \eta_p, t)}{dt} + \alpha_1 \lambda_{mm}^2 \tilde{\theta}(\beta_m, \gamma_n, \eta_p, t) = \frac{\alpha_1}{k_1} \bar{q}(\beta_m, \gamma_n, \eta_p), \quad (8)$$

式中 $\alpha_1 = k_1 / \rho c_p, \lambda_{mm}^2 = \beta_m^2 + \gamma_n^2 k_2 / k_1 + \eta_p^2 k_3 / k_1$. 其满足边界条件(5)式的解为

$$\tilde{\theta}(\beta_m, \gamma_n, \eta_p, t) = \exp(-\alpha_1 \lambda_{mm}^2 t) \frac{\alpha_1}{k_1} \int_0^t \exp(\alpha_1 \lambda_{mm}^2 t') \bar{q}(\beta_m, \gamma_n, \eta_p) dt', \quad (9)$$

用(7)式形式对(9)式进行三次逆变换,即可得原问题的解为

$$\theta(x, y, z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{X(\beta_m, x) Y(\gamma_n, y) Z(\eta_p, z)}{N(\beta_m) N(\gamma_n) N(\eta_p)} \exp(-\alpha_1 \lambda_{mm}^2 t) \frac{\alpha_1}{k_1} \int_0^t \exp(\alpha_1 \lambda_{mm}^2 t') \bar{q}(\beta_m, \gamma_n, \eta_p) dt', \quad (10)$$

其中

$$\bar{q}(\beta_m, \gamma_n, \eta_p) = \iiint_{0,0,0}^{a,b,c} q(x', y', z') \cos(\beta_m x') \cos(\gamma_n y') \cos(\eta_p z') dx' dy' dz' = \frac{2\alpha(1-R)p}{\pi \omega_p^2} \int_0^a \exp\left(-2 \frac{x'^2}{\omega_p^2}\right) \cos \beta_m x' dx' \int_0^b \exp\left(-2 \frac{y'^2}{\omega_p^2}\right) \cos \gamma_n y' dy' \int_0^c \exp(-\alpha z) \cos \eta_p z' dz'. \quad (11)$$

(10)式即为采用积分变换法得出的靶材三维瞬态温度场解析表达式。

3 计算分析

3.1 模型仿真

以 SiC 为例,材料的热物性参数如表 1 所示。

表 1 SiC 的物性参数

Table 1 Physical parameters of SiC

| Density $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | Specific heat capacity $c_p / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ | Optical absorption coefficient α / cm^{-1} | Thermal conduction coefficient ^[15] $k / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ | Reflection coefficient R |
|---|--|---|--|-------------------------------|
| 3.12 | 0.68 | 1000 | $k_x = 290.47$ $k_y = 395.68$ $k_z = 353.32$ | 0.4 |

假设激光峰值功率为 1000 W,光斑半径为 2 mm,样品尺寸为 20 mm×20 mm×5 mm, x, y 方向的表面换热系数都为 $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, z 方向的表面换热系数为 $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$,辐照 1 s 后, SiC 表面温度场分布如图 2(a)所示,温度分布类似于高斯分布,中心处的最高温升为 549.8 K(相对环境温度)。由图 2(b)可以看出由于 y 方向上的导热系数大于 x 方向上的导热系数,引起晶体内部能量的非对称传播,在距加热光束中心位置相同距离处

y 方向的热波幅度大于 x 方向的热波幅度。而靠近光斑中心处,热波分布保持了径向对称的性质,这是由于半径较小处径向对称的热源分布起主导作用。而当横向热扩散长度与高斯光束光斑相比较大时,热波分布的各向异性才会比较明显。图 2(c)为材料中心 z 分别为 0, 1, 5 mm 处的温度场随激光照射时间的变化情况。从中可以看出材料温度随时间不断提高并最终趋于稳定,同时材料 z 轴方向的温度随着深度增大而减小。

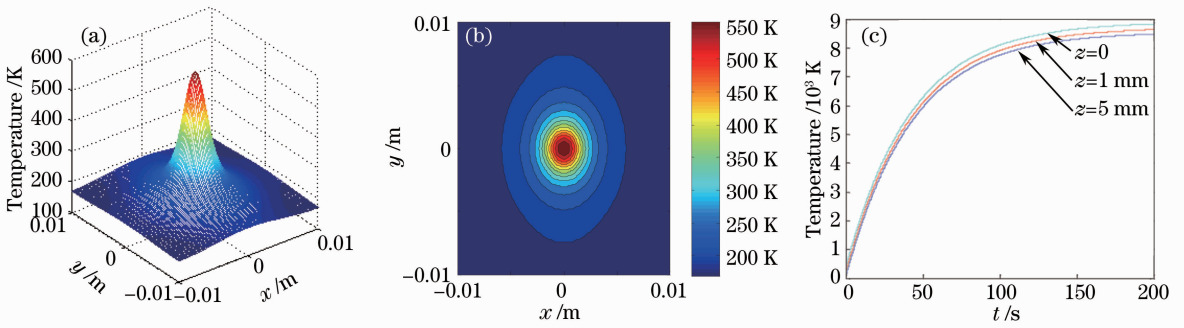


图 2 (a) $t=1$ s, 材料表面温度场分布; (b) 材料表面温度场等温线; (c) 材料中心不同深处温度场随激光照射时间的变化情况

Fig. 2 (a) $t=1$ s, temperature field distribution of the material surface; (b) isotherms of the material surface; (c) temperature field changes with the irradiation time at different depths of the material center

3.2 激光参数对温度场的影响

激光参数是影响材料温度场最为主要的因素。图 3(a)为激光半径 $r=2$ mm, 辐照时间 $t=1$ s 时, 材料表面中心处温度随入射激光功率的变化情况, 从中可以看出, 温度与入射激光的功率大致呈线性关系。图 3(b)是激光功率为 1000 W, 光斑半径分

别为 2 mm 和 5 mm, 辐照时间为 1 s 时, 材料表面中心沿 x 轴方向上的温度场分布, 从中可以看出, 由于光斑半径大时其相应的功率密度小, 导致材料的温升相对较低。这是因为激光功率一定时, 光斑尺寸越大, 材料单位面积吸收的能量就越小, 因而激光引起的温升就越小。

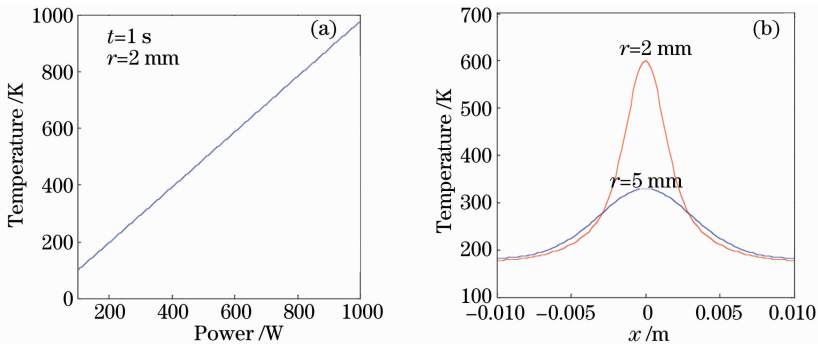


图 3 (a) 材料表面中心温度随激光功率的变化; (b) 材料表面中心沿 x 轴方向温度场分布

Fig. 3 (a) Temperature changes with the laser power at the material surface; (b) temperature field distributions of the material surface along x -axis direction

3.3 换热系数对温度场的影响

为说明不同表面热交换系数对温度场分布的影响, 假设激光功率为 1000 W, 光斑半径为 2 mm。

图 4(a)为 x, y 方向上的表面换热系数都分别为 50,

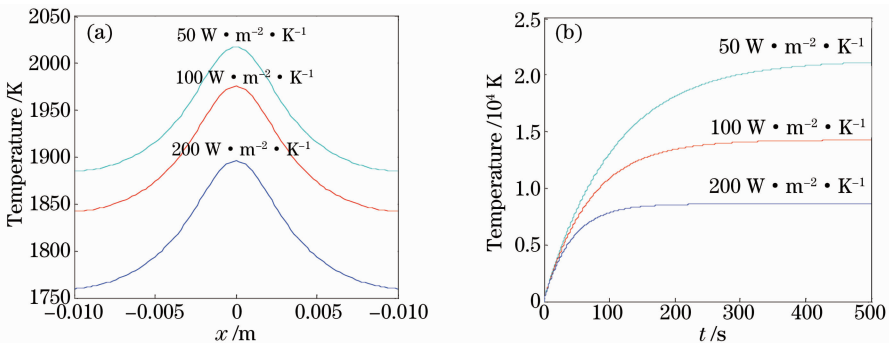


图 4 (a) 不同换热系数下材料表面中心沿 x 轴方向的温度分布; (b) 不同换热系数下材料表面中心处的温度随时间的变化情况

Fig. 4 (a) Temperature distributions of the material center along x -axis direction at different heat transfer coefficients; (b) temperature of the material surface center changes with the time at different heat transfer coefficients

100, 200 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 时, z 方向换热系数不变仍为 $50 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, 激光辐照材料 10 s 时, 材料表面中心沿 x 轴方向上的温升情况, 可以看出材料换热系数的不同将影响温度场分布。随着表面热交换系数的增大, 温度降低。图 4(b) 给出了不同换热系数下, 材料表面中心处温度随时间的变化情况, 可以看出换热系数越大, 材料达到稳态的时间就越短, 温升越小。

4 结 论

利用积分变换的方法得到了材料在连续高功率激光辐照下温度场的瞬态解析解, 并以 SiC 材料为例进行了仿真和理论分析。研究表明材料的各向异性使温度场产生非对称的温度分布。综合激光功率及光斑半径的影响情况可以看出激光功率密度是影响材料温升的关键, 功率密度越大, 导致最后的温升越大。同时材料与环境的换热系数影响靶材最后的温升大小及到达稳态的时间。本实验对于分析高功率激光加工靶材时产生的实际温度分布具有重要的参考意义。

参 考 文 献

- 1 Zhao Fengyan, Zhang Ji, Wang Chao. Temperature field of semiconductor materials irradiated by CW laser[J]. J Changchun University, 2011, 21(12): 73-76.
赵凤艳, 张季, 汪超. 连续激光辐照半导体材料的温度场[J]. 长春大学学报, 2011, 21(12): 73-76.
- 2 Zhao Fenyang. Study of Thermal Effect on Metal and Semiconductor Materials Irradiated by Continuous Wave Laser [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011.
赵凤艳. 连续激光辐照金属材料 and 半导体材料的热效应分析[D]. 长春: 长春理工大学, 2011.
- 3 Liu Yuanxing, Liu Shibing, Chen Tao. Mechanism of ablation in short-pulse laser-copper target interaction[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(8): 1271-1274.
刘院省, 刘世炳, 陈涛. 短脉冲激光刻蚀加工铜材料的机制[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(8): 1271-1274.
- 4 Yang Chengjuan, Mei Xuesong, Wang Wenjun, *et al.*. Femtosecond laser ablation on gold-chromium film[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(1): 61-65.
杨成娟, 梅雪松, 王文君, 等. 金铬薄膜的飞秒激光烧蚀加工[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1): 61-65.

- 5 Yang Sen, Zhong Minlin, Zhang Qingmao, *et al.*. New techniques to rapidly manufacture metal parts with laser[J]. Laser Technology, 2001, 25(4): 254-257.
杨森, 钟敏霖, 张庆茂, 等. 激光快速成型金属零件的新方法[J]. 激光技术, 2001, 25(4): 254-257.
- 6 Li Yuhua, Ma Fajun, Dai Nengli, *et al.*. Ultra-short pulsed laser-induced damage in inorganic silicon materials[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(7): 1009-1013.
李玉华, 马法君, 戴能利, 等. 超短脉冲激光对无机硅材料的损伤[J]. 中国激光, 2007, 34(7): 1009-1013.
- 7 Hu Peng, Chen Faliang. A simple model of micro-damage mechanism of SiO_2 under short pulse laser irradiation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(11): 1771-1774.
胡鹏, 陈发良. 短脉冲激光辐照下 SiO_2 损伤微观机理简化模型[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(11): 1771-1774.
- 8 A N Burgess, K E Evans, M Mackay, *et al.*. Comparison of transient thermal conduction in tellurium and organic dye based digital optical storage media[J]. J Appl Phys, 1987, 61(1): 74-80.
- 9 B Liu. Modeling and Study of High Density Magneto-Optic and Perpendicular Recording[D]. Manchester, UK: Department of Electrical Engineering, University of Manchester, 1993.
- 10 M Mansuripur, G A N Connell, J W Goodman. Laser-induced local heating of multilayer [J]. Appl Opt, 1982, 21(6): 1106-1114.
- 11 Duan Xiaofeng, Wang Yuefeng, Niu Yanxiong, *et al.*. Analytic calculation and evaluation of thermal and mechanical damage in optical materials induced by laser[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(12): 1455-1459.
段晓峰, 汪岳峰, 牛燕雄, 等. 激光辐照光学材料热力效应的解析计算和损伤评估[J]. 中国激光, 2004, 31(12): 1455-1459.
- 12 Huang Feng, Niu Yanxiong, Wang Yuefeng, *et al.*. Calculation of thermal and mechanical effect induced by laser in optical window materials [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(4): 576-580.
黄峰, 牛燕雄, 汪岳峰, 等. 光学窗口材料激光辐照热力效应的解析计算研究[J]. 光学学报, 2006, 26(4): 576-580.
- 13 Niu Yanxiong, Zhang Shulian, Yao Jianquan, *et al.*. Thermal and mechanical breakage induced by high power laser on optical and photoelectric elements [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(9): 32-42.
牛燕雄, 张书练, 姚建铨, 等. 高功率激光对光电器件的热-力破坏效应[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(9): 32-42.
- 14 Hu Hanping. Heat Conduction Theory[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2010.
胡汉平. 热传导理论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010.
- 15 Su Guoping, Tang Dawei, Zheng Xinghua, *et al.*. Determination of thermal conductivity of anisotropic SiC crystal using 3ω method [J]. J Engineering Thermophysics, 2011, 32(11): 1885-1888.
苏国萍, 唐大伟, 郑兴华, 等. 3ω 方法测量各向异性 SiC 晶体的导热系数[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(11): 1885-1888.

栏目编辑: 韩峰